基于SPEI的黄河流域多尺度干湿特征分析

高秉丽，巩 杰，李 焱，靳甜甜
（兰州大学资源环境学院/西部环境教育部重点实验室，甘肃 兰州 730000）

摘 要：基于1960—2020年黄河流域70个气象站点逐日观测资料，利用降水量和潜在蒸散发计算标准化降水蒸散指数（Standardized Precipitation Evapotranspiration Index，SPEI），研究了1960—2020年黄河流域干湿演变及持续性特征，分析了气象因子对流域干湿变化的影响。结果表明：（1）不同时间尺度上，SPEI反映的干湿等级及频率有一定的差异性，干湿等级以正常和轻度为主；年际变化上，1960—2020年黄河流域夏季呈不显著变湿趋势，流域年、春季、秋季和冬季均呈不显著的变干趋势。空间尺度上，夏季以变湿为主，SPEI呈上升趋势的站点占总站点的比例为64.29%；流域年、春季、秋季和冬季以变干为主，SPEI呈下降趋势的站点占总站点的比例分别为51.43%、62.86%、64.29%和51.43%。（2）从干湿事件的不同时间尺度看，1970—1979年为典型的偏干时段，而1960—1969年为典型的偏湿时段，干湿事件发生频率为：秋季>夏季>春季>冬季。（3）从干湿事件的持续性特征看，持续性干旱事件强度变大，主要发生在秋季和冬季；持续性湿润事件强度增加，主要发生在秋季。（4）1960—2020年黄河流域年SPEI呈下降趋势，主要是由降水量、平均风速及相对湿度的降低共同作用的。

关键词：SPEI；干湿变化；持续性；黄河流域

联合国政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change，IPCC）第六次评估报告指出，全球气候变暖是不争的事实[1]。气候变暖导致全球和区域水分循环加快，降水、径流及蒸散发等水分平衡过程发生改变，对气候干湿状况及水资源供需平衡产生重要影响，进而影响着区域农业生产、经济发展及生态环境质量[2]。因此，研究干湿变化对区域旱涝等气候事件防治及社会经济发展具有现实意义[3]。目前广泛使用标准化降水蒸散指数（Standardized Precipitation Evapotranspiration Index，SPEI）表征区域干湿变化，其综合考虑了蒸散发和降水对区域干湿变化的影响，融合了Palmer干旱指数（Palmer Drought Severity Index，PDSI）对温度敏感的特点和标准化降水指数（Standardized Precipitation Index，SPI）多尺度、多空间的特征[4]。近年来，众多学者采用SPEI开展了全国及区域干湿变化研究。Wu等[5]研究了中国1960—2014年干旱特征，发现1960—2014年中国SPEI变化趋势不显著，1993年为干旱转折点，在此之后干旱的严重程度、影响面积和发生频率均增加；王东等[6]发现1960—2012年中国西南地区呈干旱化趋势且干旱强度不断增加；马彬等[7]对中国东部季风区近53 a干旱时空变化特征进行了研究，指出东部季风区各时间尺度的干旱面积覆盖率均呈扩大趋势；赵林等[8]分析发现湖北省干旱站次比和干旱强度变化趋势基本一致，表明SPEI适用于监测全球增温背景下干湿气候时空演变特征。

黄河流域位于欧亚大陆的中纬度地区，大部分地区属于我国干旱半干旱区，是我国气候变化敏感区和生态环境脆弱区。受地理位置和东亚季风气候的影响，流域水资源条件先天不足且降水不均，是我国旱涝灾害特别是旱灾频发地区之一[9]，有“十年九旱”之说。特别是近61 a来，在气候变化和人类活动的共同作用下，黄河流域气温明显升高，干旱发生频率显著提高，影响程度日益加剧，给流域粮食生产、能源、城市供水及生态环境带来了极大风险[10]。日益凸显的干旱问题已成为阻碍黄河流域经济发展的重大问题。目前已有学者[11-12]利用SPEI

收稿日期：2021-08-03； **修订日期：**2021-11-03
基金项目：国家自然科学基金项目（41991231）
作者简介：高秉丽（1997-），女，硕士研究生，主要从事流域气候变化与水文过程研究. E-mail: gaobl2019@lzu.edu.cn
通讯作者：巩杰. E-mail: jgong@lzu.edu.cn

对黄河流域进行了研究，发现黄河流域干旱程度加剧；任怡[13]、周帅等[14]基于其他干旱指数的研究也得出了相同结论，表明基于SPEI的相关研究能很好的揭示黄河流域干湿特征。但这些研究计算SPEI采用仅需气温数据的Thornthwaite公式，未能综合考虑影响干湿变化的其他自然因素，这样就可能高估全球增温下的干旱趋势和强度[15]。王作亮等[16]认为，SPI较基于Thornthwaite公式的SPEI更适用于黄河源区干旱程度的评估，原因为基于Thornthwaite公式的SPEI在青藏高原地区计算误差较大。还有研究表明，基于Penman-Monteith公式的SPEI在中国干旱监测中表现优于基于Thornthwaite公式的SPEI，特别在干旱地区[17]；且SPEI从理论上较SPI更为完善[16]。鉴于此，本研究利用基于Penman-Monteith公式的SPEI揭示了1960—2020年黄河流域干湿气候时空演变特征及持续性，并探讨了不同气象因子对黄河流域干湿变化的影响，以期为全球增暖背景下进一步认识黄河流域干湿事件提供参考。

1 数据来源与方法

1.1 研究区概况

黄河流域位于我国中北部地区(32°10′~41°50′N，95°53′~119°05′E)，发源于青藏高原巴颜喀拉山，流经青、川、甘、宁、内蒙古、陕、晋、豫、鲁9省区，于山东垦利县注入渤海，总面积约79.5×10^4 km^2(图1)。流域地势起伏剧烈，自西向东横跨青藏高原、内蒙古高原、黄土高原和黄淮海平原。黄河流域自西向东依次为干旱区、半干旱区、半湿润区和湿润区，全流域多年平均降水量440 mm，多年平均温度7 ℃，降水量和气温均呈南高北低、东高西低的特征[18]。需要强调的是，本文提及的省份仅表示相应省份在黄河流域的区域，而非完整省域[19]。

1.2 数据来源

黄河流域86个气象站点1960—2020年的逐日最高气温(℃)、平均气温(℃)、最低气温(℃)、降水量(mm)、相对湿度(%)、日照时数(h)及平均风速(m·s^{-1})等数据来源于中国气象数据网(http://data.cma.cn/)。以缺测数据不能超过0.1%为标准[20]，并经过数据质量及有效性检查，筛选出数据较完整的70个站点。其中，站点缺测数据及异常值采用该日相邻2 d该气象要素的平均值进行插补[21]。

1.3 研究方法

1.3.1 标准化降水蒸散指数SPEI　SPEI是Vicente-Serrano等[22]于2010年在SPI基础上提出的，通过降水量和潜在蒸散发差值偏离平均状态的程度来表征某区域干湿状态[23]。SPEI计算的关键是潜在蒸散发，相较于Thornthwaite公式，基于Penman-Monteith公式获得的潜在蒸散发与干旱区、湿润区的实测数据契合度更高[24]。因此，基于Penman-Monteith公式计算潜在蒸散发，采用刘钰等[25]研究结果修正Penman-Monteith公式中的净辐射，使其能更好的适

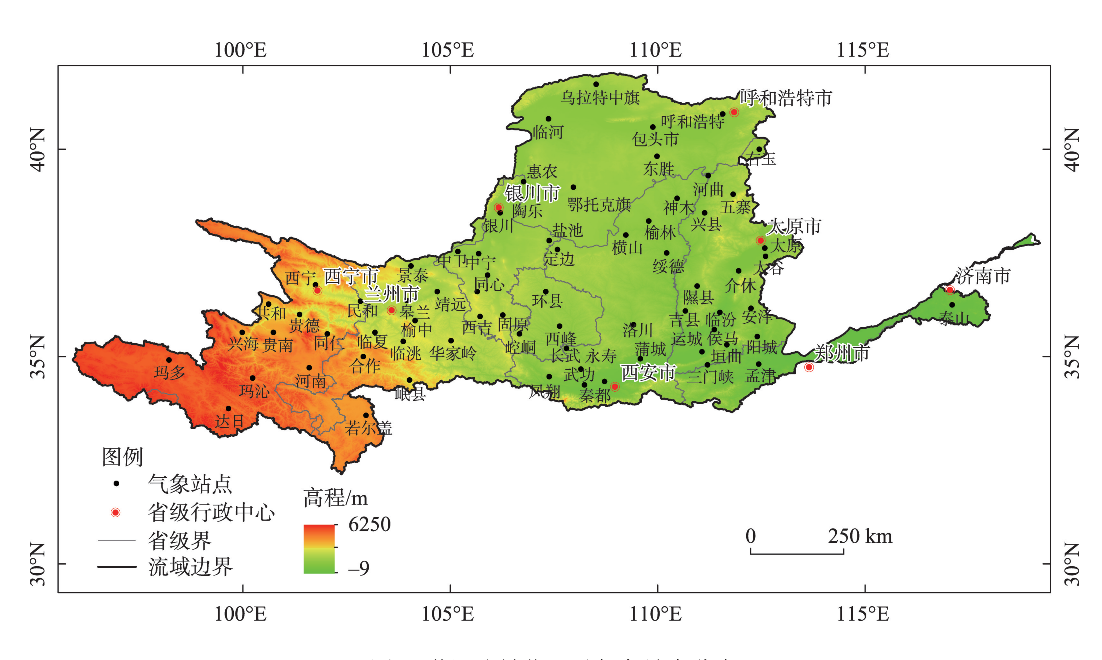


图1　黄河流域位置及气象站点分布

Fig. 1　Location and spatial distribution of the meteorological stations in the Yellow River Basin

用于黄河流域。SPEI具体计算过程参见文献[26]。SPEI具有多时间尺度特征，SPEI-1(1个月时间尺度)反映月干湿水平，SPEI-3(3个月时间尺度)反映季节干湿水平，SPEI-6(6个月时间尺度)反映6个月尺度干湿水平，SPEI-12(12个月时间尺度)反映年干湿水平[4]。研究分别选取SPEI-3中5月、8月、11月和次年2月的SPEI表征春季(3—5月)、夏季(6—8月)、秋季(9—11月)和冬季(12月—次年2月)干湿状况，选取SPEI-12中12月的SPEI表征年际干湿状况。文中根据表1标准进行各类干湿事件划分[27]。

1.3.2 气候倾向率　气候倾向率是利用一元线性回归方程表示某一气象因子在某个时间段内的变化趋势，其计算公式：

$$y_i = a + bt_i,\ i = 1,2,\cdots,n \tag{1}$$

式中：y_i 为样本大小为 n 的气象因子；t_i 为 y_i 所对应的时间；a 为回归常数；b 为回归系数；a 和 b 用最小二乘法计算。文中将 $b\times10$ 作为气象因子的气候倾向率，并对拟合回归方程的显著性进行 F 检验($P<0.05$)。利用气候倾向率分析1960—2020年黄河流域SPEI和不同气象因子变化趋势。

1.3.3 偏相关分析　偏相关分析指在多个变量构成的系统中，当研究2个变量之间的相关程度时，把其他要素的影响视为常数，即暂不考虑其他变量的影响，单独研究2个变量之间的线性相关程度，所得结果为偏相关系数。其计算公式如下：

$$r_{xy,z} = \frac{r_{xy} - r_{xz}r_{yz}}{\sqrt{\left(1-r_{xz}^2\right)\left(1-r_{yz}^2\right)}} \tag{2}$$

式中：$r_{xy,z}$ 为控制了 z 的条件下，x、y 之间的偏相关系数。r_{xy} 为变量 x、y 间的相关系数；r_{xz} 为变量 x、z 间的相关系数；r_{yz} 为变量 y、z 间的相关系数。利用偏相关分析探讨不同气象因子对黄河流域干湿变化的影响。

2 结果与分析

2.1 黄河流域SPEI时间变化特征

2.1.1 不同时间尺度SPEI趋势变化　由图2可知，黄河流域不同时间尺度的SPEI随时间变化的敏感性不同，时间尺度越短，干湿波动越频繁；反之，时间尺度越长，干湿波动越平缓。

SPEI-1在1960—2020年间波动幅度最大，说明受月尺度降水和气温的影响，干湿交替比较频繁(图2a)。研究时段内正常、轻度干旱(湿润)、中等干旱(湿润)、极端干旱(湿润)在所有干湿事件中所

表1 基于SPEI的干湿等级划分

Tab. 1 Classification of drought and wet grade based on SPEI

干湿等级	极端干旱	中等干旱	轻度干旱	正常	轻度湿润	中等湿润	极端湿润
SPEI	≤-2.0	(-2.0,-1.0]	(-1.0,-0.5]	(-0.5,0.5]	(0.5,1.0]	(1.0,2.0]	>2.0

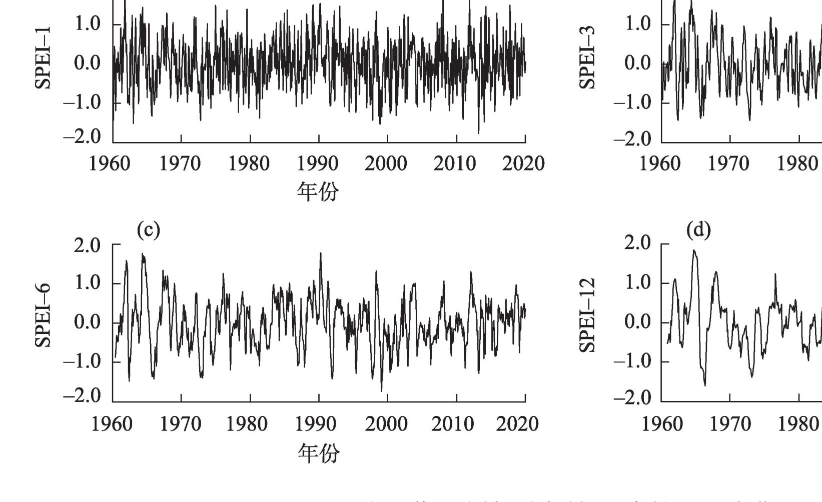


图2 黄河流域不同时间尺度的SPEI变化

Fig. 2 Variations of SPEI at different time scales in the Yellow River Basin

占的百分比分别为55.87%、16.53%(14.62%)、6.01%(6.97%)和0%(0%),表明随着干湿等级的不断加重,其对应的干湿事件比例也逐渐减少。其中,中等干旱主要发生在秋季,轻度干旱在春季发生的次数多于其他季节,轻度湿润主要发生在夏冬季,中等湿润主要发生在春季。

SPEI-3的波动特点与SPEI-1相似,但波动频率较平缓(图2b)。研究时段内,1960—2020年间正常、轻度干旱(湿润)、中等干旱(湿润)、极端干旱(湿润)在所有干湿事件中所占的百分比分别为55.75%、16.16%(16.99%)、5.48%(5.62%)和0%(0%);其中,中等干旱和轻度湿润在秋季发生频率最高,轻度干旱在夏季发生频率最高,中等湿润在春季发生频率最高。

从SPEI-6序列中可以看出,1960—2020年间正常、轻度干旱(湿润)、中等干旱(湿润)、极端干旱(湿润)在所有干湿事件中所占的百分比分别为58.60%、14.44%(15.41%)、6.60%(4.95%)、0%(0%);其中,中等干旱在冬季发生的频率高于其他季节,轻度干旱和轻度湿润均在夏季发生频率最高,中等湿润主要发生在春冬季(图2c)。

从SPEI-12序列中可知,1960—2020年间正常、轻度干旱(湿润)、中等干旱(湿润)、极端干旱(湿润)在所有干湿事件中所占的百分比分别为57.70%、18.31%(15.12%)、4.30%(4.57%)和0%(0%);其中,中等干旱在春冬两季的发生频率略高于夏秋两季,轻度干旱在秋季发生频率最高,轻度湿润主要发生在春夏季,中等湿润在冬季发生频率最高(图2d)。此外,黄河流域不同时间尺度的SPEI均呈下降趋势(图2),表明黄河流域在过去61 a来气候逐渐变干。

2.1.2 SPEI年际及季节变化特征　1960—2020年黄河流域夏季SPEI呈上升态势,表现出湿润化趋势(图3c);流域年、春季、秋季和冬季SPEI呈下降态势,表现出干旱化趋势(图3)。由图3a可见,1960—2020年黄河流域年尺度SPEI波动频繁,呈不显著下降态势,倾向率为$-0.008\cdot(10a)^{-1}$。具体而言,SPEI小于-0.5,即发生干旱的年份分别为1960年、1965年、1969年、1972年等16个年份,其中1965年、1972年、1997年SPEI小于-1.0,为中度干旱。由季节变化特征来看,流域夏季SPEI呈上升趋势,即湿润化趋势[倾向率为$0.044\cdot(10a)^{-1}$];春季、秋季和冬季SPEI倾向率均为负值,说明春季、秋季和冬季的SPEI均呈不同程度的下降趋势,即呈干旱化趋势,且四季SPEI变化趋势均不显著(图3b~图3e),与已有研究结果一致[28]。

2.2 SPEI空间变化特征

1960—2020年黄河流域年和季节尺度的SPEI年际变化空间差异明显(图4)。黄河流域年SPEI呈上升和下降趋势的站点分别占总站点数的48.57%和51.43%,青海西北部、甘肃北部等地站点SPEI呈显著上升趋势,SPEI呈显著下降趋势的站点主要分

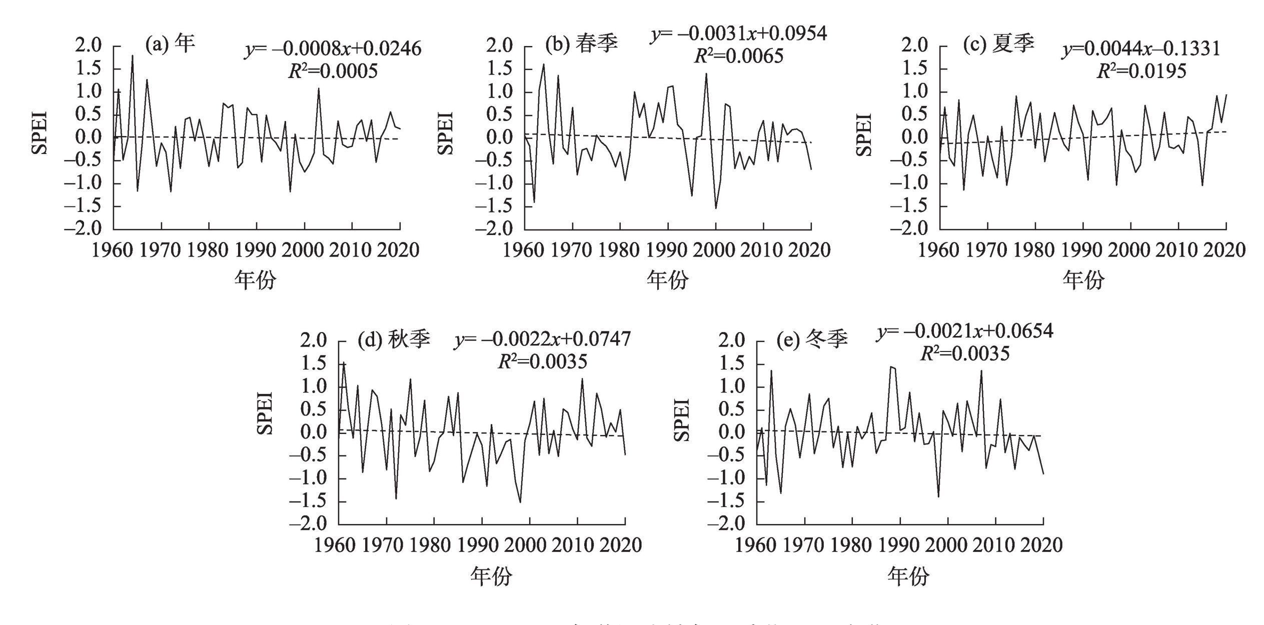


图3　1960—2020年黄河流域年和季节SPEI变化

Fig. 3　Inter-annual and seasonal variations of SPEI in the Yellow River Basin from 1960 to 2020

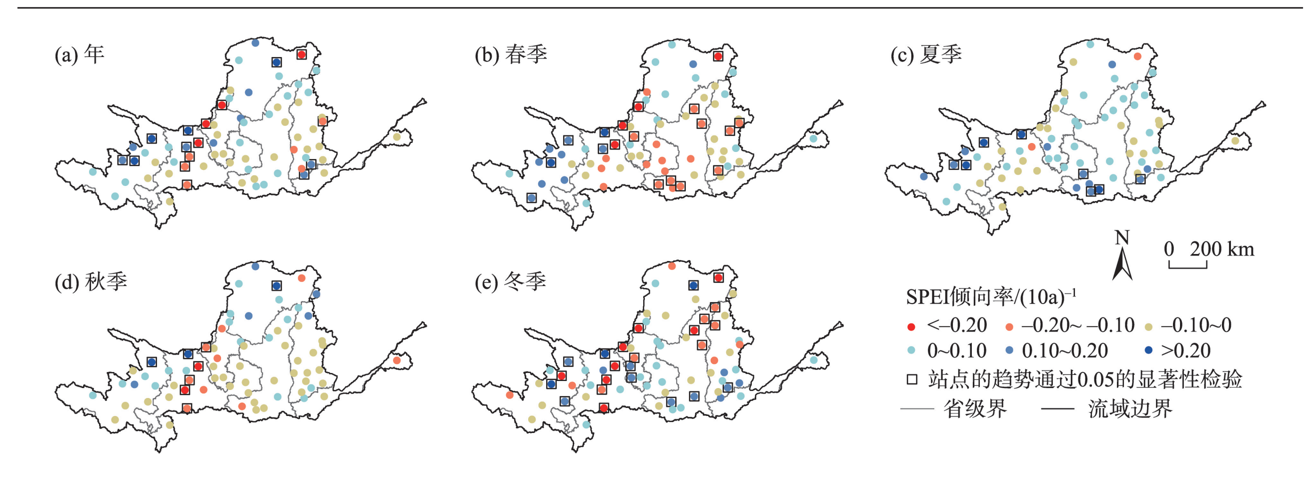


图4 1960—2020年黄河流域年和四季SPEI气候倾向率空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of climate trend rate of annual and seasonal SPEI in the Yellow River Basin from 1960 to 2020

布于甘肃中部、宁夏西北部等地，SPEI倾向率的空间分布特征不仅与气象因子相关，还受大气环流和海陆分布的影响(图4a)。春季62.86%的站点SPEI呈下降趋势，主要分布于甘肃、山西大部及陕西等地，通过显著性检验的站点仅占18.57%，主要位于宁夏西北部、陕西东北角和西南角等地，下降幅度均低于−0.10·$(10a)^{-1}$(图4b)。夏季64.29%的站点SPEI处于上升趋势，表明该季节流域干旱状况有所缓解，其中11.43%显著上升的站点主要分布在青海西北部及陕西西南角等地，上升幅度均大于0.10·$(10a)^{-1}$；35.71%的站点SPEI呈下降趋势，其中靖远站的SPEI下降幅度最大(图4c)。秋季SPEI处于上升和下降趋势的站点分别占35.71%和64.29%，仅西宁站、景泰站和包头站SPEI呈显著上升趋势，呈显著下降趋势的站点主要分布在甘肃中部(图4d)。黄河流域冬季51.43%的站点SPEI呈下降趋势，其中20.00%通过显著性检验的站点主要分布在甘肃中部、宁夏和山西西北部及陕西的东北角等地(图4e)。

综上所述，黄河流域SPEI除夏季外，年及春季、秋季和冬季下降站点数均大于上升站点数，表明黄河流域除夏季外，流域年、春季、秋季和冬季均存在变干趋势。

2.3 黄河流域干湿的多时间尺度特征

为充分了解黄河流域1960—2020年干湿事件的演变特征，依据表1划分标准，统计了流域61 a来70个站点每月的SPEI，绘制出不同年代及不同季节干湿事件发生频率图(图5)。由图5a可知，1960—2020年黄河流域干湿事件总频率整体呈减少趋势，1980—1989年干湿事件累计频率最小，为61.37%，且1960—2020年干旱事件发生频率大于湿润事件。从干旱事件发生频率而言，6个时段整体呈现

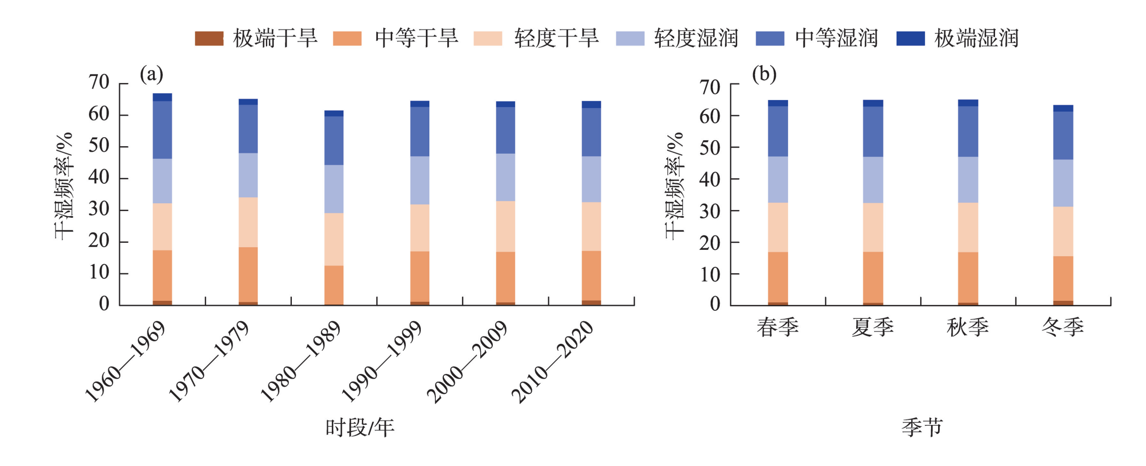


图5 1960—2020年黄河流域不同时段(a)和不同季节(b)干湿发生频率

Fig. 5 Frequency of drought and wet in different periods (a) and seasons (b) in the Yellow River Basin from 1960 to 2020

"增-减-增"的变化趋势,其中1970—1979年干旱事件发生频率多于其他时段,是典型的偏干时段;从湿润事件发生频率而言,除了2000—2009年轻度湿润发生频率高于中等湿润,其余时段中等湿润发生频率均高于轻度湿润,此外1960—1969年湿润事件发生频率高于其他5个时段,是典型的偏湿时段。

由图5b可知,黄河流域不同季节干湿事件发生频率大小为:秋季>夏季>春季>冬季,其中,极端干旱在冬季发生频率最高,为1.67%;夏秋季极端湿润发生频率最高,均为1.76%;而轻度和中等干湿事件各季发生频率相当。季节性干湿能很好的反映农业旱涝状况,因此,在农业方面应做好冬旱和夏涝秋涝的预警工作,起到防灾减灾的作用。

2.4 黄河流域干湿持续性特征

由于以往对黄河流域干湿的持续性特征分析相对较少,事实上持续性干湿事件对农业生产损失更为严重,因此本研究采用SPEI-1数据,依据SPEI的干湿等级划分标准,定义连续3个月SPEI≤-0.5(发生轻度干旱及以上)为1次连续干旱过程,连续3个月SPEI>0.5(发生轻度湿润及以上)为1次连续湿润过程,将该干湿过程的SPEI平均值作为此次干湿事件的SPEI,将持续性干湿事件的SPEI最小(大)值作为此次持续性干(湿)事件的强度[29],干湿事件的持续时间也可以反映干湿事件的严重程度,持续时间越长,干湿状况越严重[30]。表2和表3分别给出了1960—2020年持续性干湿事件发生时间、强度和持续时间。

由表2可知,1960—2020年黄河流域共发生持续性干旱事件9次;从持续时间长度来看,除了2次持续4个月,其他7次均持续3个月;从发生年代来看,20世纪60、70年代各2次,90年代3次,而21世纪以来共2次;从强度来看,1998年开始的持续性干旱事件累计SPEI<-4.0,明显小于其他8次,且最小月SPEI和月平均SPEI均为9次干旱事件中的最小值,表明1998年11月到1999年2月发生了最强干旱事件,从强度变化趋势来看,1960—2020年持续性干旱事件的强度趋于变大;从跨越季节来看,春夏季均发生3次,累计分别为8个月和4个月,秋冬季均发生5次,累计分别为8个月和9个月,从发生季节来看,秋冬季发生持续性干旱事件的概率最

表2 持续性干旱事件发生时间、强度和持续时间

Tab. 2 Time, intensity and duration of the persistent drought event

起始时间/年-月	跨越季节	持续时间	最小SPEI	累计SPEI	月平均SPEI
1962—02	冬、春	4个月	-1.04	-3.79	-0.95
1965—12	冬	3个月	-1.02	-2.64	-0.88
1970—10	秋、冬	3个月	-0.97	-2.16	-0.72
1972—08	夏、秋	3个月	-1.44	-3.13	-1.04
1991—07	夏、秋	3个月	-1.07	-2.76	-0.92
1997—08	夏、秋	3个月	-1.43	-3.08	-1.03
1998—11	秋、冬	4个月	-1.52	-4.28	-1.07
2000—03	春	3个月	-1.25	-2.84	-0.95
2004—02	冬、春	3个月	-1.09	-2.94	-0.98

表3 持续性湿润事件发生时间、强度和持续时间

Tab. 3 Time, intensity and duration of the persistent wet event

起始时间/年-月	跨越季节	持续时间	最大SPEI	累计SPEI	月平均SPEI
1961—08	夏、秋	4个月	1.71	4.42	1.11
1967—03	春	3个月	0.98	2.89	0.96
1967—11	秋、冬	3个月	1.29	2.53	0.84
1975—09	秋、冬	4个月	1.10	3.60	0.90
1989—11	秋、冬、春	6个月	1.54	6.31	1.05
1991—03	春	3个月	1.09	2.60	0.87
2011—11	秋、冬	3个月	1.70	3.30	1.10

大，其次是春季，夏季发生持续性干旱事件的概率最小。

由表3可知，1960—2020年黄河流域共发生持续性湿润事件7次；从持续时间长度来看，除1次持续6个月，其他6次均持续3或4个月；从发生年代来看，20世纪60年代3次，70、80、90年代各1次，而21世纪以来1次；从强度变化看，最明显的是1989年11月到1990年4月的湿润事件，其累计SPEI和月平均SPEI分别为6.31和1.05，最大月SPEI为1.54，其强度位于第三，此外，1961年的持续性湿润时间最大月SPEI为1.71，其强度最大，从强度变化趋势来看，1960—2020年持续性湿润事件的强度有略微增强的趋势；从跨越季节来看，春季共发生3次，累计8个月，夏季共发生1次，累计1个月，秋季共发生5次，累计9个月，冬季共发生4次，累计8个月，从发生季节来看，秋季发生持续性湿润事件的概率最大，其次是春冬季，夏季发生持续性湿润事件的概率最小。

2.5 黄河流域干湿影响因素分析

SPEI变化受降水量和潜在蒸散发共同影响，而潜在蒸散发又与最高气温、平均气温、最低气温、相对湿度、日照时数及平均风速等气象因子变化相关。因此，为探讨黄河流域干湿变化的影响因素，选取降水量、最高气温、平均气温、最低气温、相对湿度、日照时数及平均风速7个气象因子，利用偏相关分析法求出黄河流域各站点7个气象因子和SPEI的偏相关系数，各气象因子对SPEI影响用偏相关系数绝对值大小表征，则SPEI与各气象因子偏相关系数绝对值大小为：降水量(r_{pcp})>平均风速(r_{ws})>相对湿度(r_{rh})>日照时数(r_{dh})>平均气温(r_t)>最低气温(r_{tmin})>最高气温(r_{tmax})，其偏相关系数分别为0.96、-0.76，0.47，-0.41，-0.18，0.06，0.05。黄河流域SPEI与前3个气象因子的偏相关系数空间分布如图6所示。除了黄河流域零星站点r_{pcp}较低外，流域大部分地区站点r_{pcp}均高于0.90，且流域西部和东部大部分地区站点的r_{pcp}高于0.96(图6a)。流域西北部站点r_{ws}绝对值偏高，甘肃西南角和陕西中南部等地站点r_{ws}绝对值偏低，且流域91.43%的站点r_{ws}绝对值高于0.50(图6b)。黄河流域r_{rh}除合作站为负值外，其余站点均为正值；其中，青海西南部、宁夏北部、内蒙古西部等地站点r_{rh}高于0.50，r_{rh}低于0.30的站点零星分布于流域中南部(图6c)。

将黄河流域每个气象站点与SPEI偏相关系数绝对值最高的2个气象因子组合(图7)，发现黄河流域第一主导因素为降水量的站点有69个(占总站点的98.57%)；其中，第一主导因素为降水量、第二主导因素为平均风速的站点共有65个(占站点总数的92.86%)，分布于流域大部；第一主导因素为降水量、第二主导因素为相对湿度的站点仅2个，分别是泰山站和华家岭站；第一主导因素为降水量、第二主导因素为日照时数的站点是河南站和临汾站。第一主导因素为平均风速，第二主导因素为降水量的站点为景泰站(图7)。可见，黄河流域大部分地区SPFI变化与降水量和平均风速有关。

通过对黄河流域降水量、平均风速和相对湿度的变化趋势分析发现(图8)，1960—2020年黄河流域降水量呈微弱减少趋势；平均风速在20世纪60年代初期和中期相对较低，在60年代末至70年代中期较高，之后呈减少趋势；相对湿度变化基本稳定，整个研究时段呈微弱减少趋势，但较平均风速的减少趋势弱。由于黄河流域降水量和相对湿度与SPEI呈正相关，平均风速与SPEI呈负相关。因

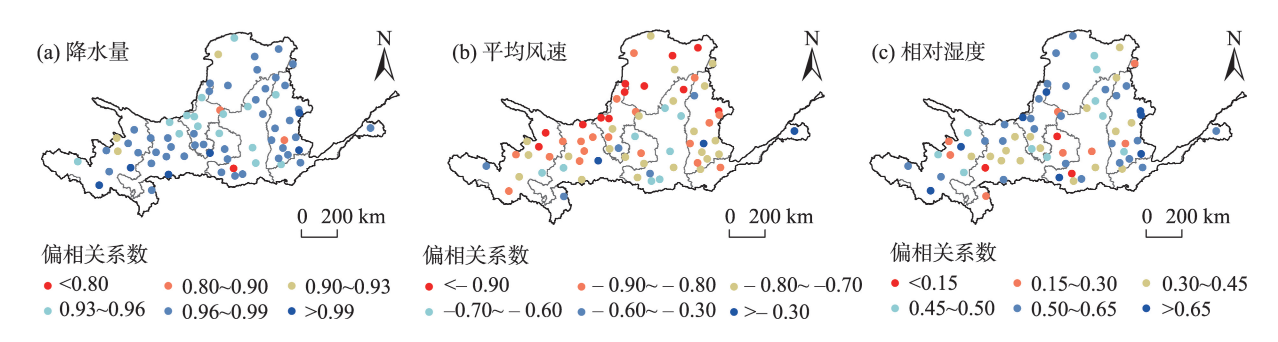
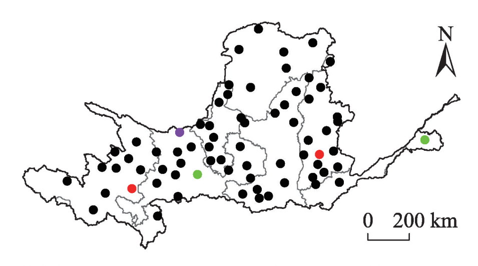


图6 1960—2020年黄河流域年均SPEI与主要气象因子偏相关系数的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of partial correlation coefficient between annual SPEI and main meteorological factors in the Yellow River Basin from 1960 to 2020



注:"+"前和"+"后的字母分别表示该站点与SPEI偏相关系数绝对值最高和次高的气象因子(pcp为降水、ws为平均风速、rh为相对湿度、dh为日照时数)。

图7 1960—2020年黄河流域各气象站点与年均SPEI偏相关系数绝对值较高的两气象因子组合分布

Fig. 7 Spatial distribution of two meteorological factors with higher absolute value of partial correlation coefficient between annual SPEI and meteorological stations in the Yellow River Basin from 1960 to 2020

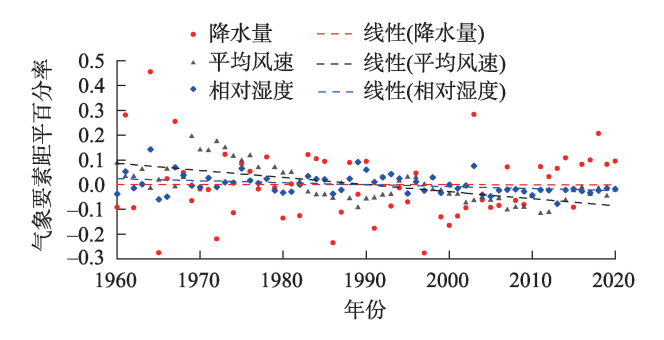


图8 1960—2020年黄河流域降水量、平均风速和相对湿度随时间相对变化趋势

Fig. 8 Relative variation trend of precipitation, average wind speed and relative humidity in the Yellow River Basin from 1960 to 2020

此,降水量的微弱减少和平均风速的减少、相对湿度的降低共同导致61 a来黄河流域SPEI整体呈微弱下降趋势。

3 讨 论

本研究选用基于Penman-Monteith公式的SPEI分析了黄河流域61 a来干湿时空变化特征,指出气候变化背景下,黄河流域除夏季外,流域年、春季、秋季和冬季均呈干旱化趋势,而王飞等[11]研究表明黄河流域除冬季外,流域年、春季、夏季和秋季均呈干旱化趋势,造成这种差异的可能原因有:(1) 选取的研究时段不同。王飞等[11]选取时段为1961—2015年,本研究选取了1960—2020年。(2) 气象站点数目、空间分布和潜在蒸散发的计算方法不同。已有研究利用黄河流域及周边124个气象站点数据,基于Thornthwaite公式获得潜在蒸散发;本研究选取了黄河流域70个气象站点,基于Penman-Monteith公式计算潜在蒸散发。相对Thornthwaite模型而言,Penman-Monteith公式不但考虑了温度要素,还结合平均风速、相对湿度、日照时数等气象因子[31],在一定程度上影响了SPEI的计算结果。空间分布上,黄河流域年SPEI在青海西北部、甘肃北部等地呈显著上升趋势,在甘肃中部和宁夏西北部等地呈显著下降趋势,流域整体呈现变干趋势。刘珂等[24]发现黄河流域整体呈现变干趋势,这与本研究的结果一致。但刘珂等[24]发现黄河流域变干的区域面积远大于变湿区域,且河套地区有显著的变干趋势,这与本研究得到的结果存在一定差异,可能由于本研究选取的流域站点数目较少而导致空间连续性不强引起,未来应利用高空间分辨率栅格数据代替站点资料以得到更加准确的结果。在黄河流域整体变干的背景下,应转被动、应急性的防旱减灾工作为积极主动抗旱工作,做好流域水土保持工作,逐步改善流域生态环境;加强流域农田水利基本建设,改善农业生产条件;加强抗旱减灾关键技术研究,提高流域综合抗旱能力,为实现黄河流域生态可持续发展做贡献。

此外,研究不同气象因子对黄河流域干湿变化的影响也十分重要。本研究分析发现,影响黄河流域干湿变化的7个气象因子中,降水量、相对湿度、最高气温和最低气温是影响干湿变化的正影响因子,平均风速、日照时数和平均气温是影响干湿变化的负影响因子。已有研究表明,黄河流域年干湿变化的主导因子为降水量和相对湿度[28],但本研究发现流域年干湿变化的主导因子为降水量和平均风速。这表明降水量是影响黄河流域干湿变化的第一主导因素,即降水量是黄河流域干湿变化的主控因素,但第二主导因素的不同原因可能在于表征黄河流域干湿变化的指标及研究时段的不同。

本研究也存在一些不足,在探讨影响黄河流域干湿变化的气象因素时,仅考虑了单个气象因子对黄河流域气候干湿变化的影响,而不同气象因子之间的相关关系和多个气象因子的综合效应还有待进一步探讨,以期更进一步明确影响黄河流域干湿变化的主导因子。某一区域的干湿变化不仅与气

象因子相关，还与人类活动、地形地势及土壤状况等多种因素相关，若将黄河流域地形地势、植被状况、土壤状况及人类活动等因素结合考虑，研究黄河流域干湿状况的时空变化规律，可以更明确的了解流域干湿变化时空特征及异常分布特征。

4 结 论

（1）不同时间尺度的SPEI反映的干湿等级及频率具有一定的差异性，干湿等级以正常和轻度为主。年际变化上，1960—2020年黄河流域夏季呈不显著变湿趋势，流域年、春季、秋季和冬季均呈不显著变干趋势。空间尺度上，黄河流域夏季以变湿为主，年、春季、秋季和冬季以变干为主。

（2）从干湿事件的不同时间尺度来看，1960—2020年黄河流域干旱事件发生频率大于湿润事件，1970—1979年是典型的偏干时段，1960—1969年是典型的偏湿时段；在季节尺度上，干湿事件发生频率秋季>夏季>春季>冬季。

（3）在干湿的持续性特征上，所有干旱事件均持续3或4个月，持续性干旱事件在秋冬季发生概率最大；持续性湿润事件在秋季发生概率最大，其次是在春冬季，夏季发生概率最小。

（4）1960—2020年SPEI呈不显著下降趋势主要是降水量、平均风速及相对湿度降低共同作用的结果。

参考文献（References）：

[1] 孙颖. 人类活动对气候系统的影响—解读IPCC第六次评估报告第一工作组报告第三章[J]. 大气科学学报, 2021, 44(5): 654–657. [Sun Ying. Impact of humanactivities on climate system: An interpretation of Chapter Ⅲ of WG Ⅰ report of IPCC AR6[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2021, 44(5): 654–657.]

[2] Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, et al. Climate Change 2021: The Physical Science Basis[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

[3] 胡琦, 董蓓, 潘学标, 等. 1961—2014年中国干湿气候时空变化特征及成因分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(6): 124–132. [Hu Qi, Dong Bei, Pan Xuebiao, et al. Spatiotemporal variation and causes analysis of dry-wet climate over period of 1961–2014 in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(6): 124–132.]

[4] 齐贵增, 白红英, 赵婷, 等. 秦岭陕西段南北坡植被对干湿变化响应敏感性及空间差异[J]. 地理学报, 2021, 76(1): 44–56. [Qi Guizeng, Bai Hongying, Zhao Ting, et al. Sensitivity and areal differentiation of vegetation responses to hydrothermal dynamics on the southern and northern slopes of the Qinling Mountains in Shaanxi Province[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(1): 44–56.]

[5] Wu Z T, Yu L, Du Z Q, et al. Recent changes in the drought of China from 1960 to 2014[J]. International Journal of Climatology, 2020, 40(7): 3281–3296.

[6] 王东, 张勃, 安美玲, 等. 基于SPEI的西南地区近53 a干旱时空特征分析[J]. 自然资源学报, 2014, 29(6): 1003–1016. [Wang Dong, Zhang Bo, An Meiling, et al. Temporal and spatial distributions of drought in Southwest China over the past 53 years based on Standardized Precipitation Evapotranspiration Index[J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(6): 1003–1016.]

[7] 马彬, 张勃, 周丹, 等. 基于标准化降水蒸散指数的中国东部季风区干旱特征分析[J]. 自然资源学报, 2016, 31(7): 1185–1197. [Ma Bin, Zhang Bo, Zhou Dan, et al. Analysis of drought characteristics of the East China monsoon area based on Standardized Precipitation Evapotranspiration Index[J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(7): 1185–1197.]

[8] 赵林, 于家烁, 薄岩, 等. 基于SPEI的湖北省近52年干旱时空格局变化[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(7): 1230–1237. [Zhao Lin, Yu Jiashuo, Bo Yan, et al. Temporal and spatial distribution of drought in Hubei Province during 1961–2012 based on SPEI[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(7): 1230–1237.]

[9] 胡娜娜, 延军平, 李双双, 等. 气候暖干化背景下黄土高原旱涝时空演变特征[J]. 干旱区研究, 2013, 30(4): 705–711. [Hu Nana, Yan Junping, Li Shuangshuang, et al. Spatiotemporal evolution of drought and flood in the Loess Plateau under climate drying-warming[J]. Arid Zone Research, 2013, 30(4): 705–711.]

[10] 黄春艳. 黄河流域的干旱驱动及评估预测研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2021. [Huang Chunyan. Drought Driving and Assessment Prediction in the Yellow River Basin[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021.]

[11] 王飞, 王宗敏, 杨海波, 等. 基于SPEI的黄河流域干旱时空格局研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2018, 48(9): 1169–1183. [Wang Fei, Wang Zongmin, Yang Haibo, et al. Study of the temporal and spatial patterns of drought in the Yellow River Basin based on SPEI[J]. Science China Earth Sciences, 2018, 48(9): 1169–1183.]

[12] 黄婷婷, 林青霞, 吴志勇, 等. 黄河流域干旱时空特征及其与ENSO的关联性分析[J]. 人民黄河, 2021, 43(11): 52–58. [Huang Tingting, Lin Qingxia, Wu Zhiyong, et al. Spatial and temporal characteristics of drought in the Yellow River Basin and their correlation with ENSO[J]. Yellow River, 2021, 43(11): 52–58.]

[13] 任怡. 黄河流域干旱特征及抗旱能力研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2017. [Ren Yi. Analysis of Drought Characteristics and Drought Resistance Ability of the Yellow River[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017.]

[14] 周帅, 王义民, 畅建霞, 等. 黄河流域干旱时空演变的空间格局研究[J]. 水利学报, 2019, 50(10): 1231–1241. [Zhou Shuai, Wang

Yimin, Chang Jianxia, et al. Research on spatio-temporal evolution of drought patterns in the Yellow River Basin[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(10): 1231-1241.]

[15] 杨睿, 耿广坡, 周洪奎, 等. 基于SPEI_PM指数的渭河流域气象干旱时空演变特征[J]. 中国农业气象, 2021, 42(11): 962-974. [Yang Rui, Geng Guangpo, Zhou Hongkui, et al. Spatial-temporal evolution of meteorological drought in the Wei River Basin based on SPEI_PM[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2021, 42 (11): 962-974.]

[16] 王作亮, 文军, 李振朝, 等. 典型干旱指数在黄河源区的适宜性评估[J]. 农业工程学报, 2019, 35(21): 186-195. [Wang Zuoliang, Wen Jun, Li Zhenchao, et al. Evaluation of suitability using typical drought index in source region of the Yellow River[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35 (21): 186-195.]

[17] Chen H P, Sun J Q. Changes in drought characteristics over China using the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index[J]. Journal of Climate, 2015, 28(13): 5430-5447.

[18] 杨泽康, 田佳, 李万源, 等. 黄河流域生态环境质量时空格局与演变趋势[J]. 生态学报, 2021, 41(19): 7627-7636. [Yang Zekang, Tian Jia, Li Wanyuan, et al. Spatio-temporal pattern and evolution trend of ecological environment quality in the Yellow River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(19): 7627-7636.]

[19] 张志强, 刘欢, 左其亭, 等. 2000—2019年黄河流域植被覆盖度时空变化[J]. 资源科学, 2021, 43(4): 849-858. [Zhang Zhiqiang, Liu Huan, Zuo Qiting, et al. Spatiotemporal change of fractional vegetation cover in the Yellow River Basin during 2000-2019[J]. Resources Science, 2021, 43(4): 849-858.]

[20] 徐一丹, 任传友, 马熙达, 等. 基于SPI/SPEI指数的东北地区多时间尺度干旱变化特征对比分析[J]. 干旱区研究, 2017, 34(6): 1250-1262. [Xu Yidan, Ren Chuanyou, Ma Xida, et al. Change of drought at multiple temporal scales based on SPI/SPEI in Northeast China[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(6): 1250-1262.]

[21] 吴霞, 王培娟, 霍治国, 等. 1961—2015年中国潜在蒸散时空变化特征与成因[J]. 资源科学, 2017, 39(5): 964-977. [Wu Xia, Wang Peijuan, Huo Zhiguo, et al. Spatio-temporal distribution characteristics of potential evapotranspiration and impact factors in China from 1961 to 2015[J]. Resources Science, 2017, 39(5): 964-977.]

[22] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index[J]. Journal of Climate, 2010, 23(7): 1696-1718.

[23] 周丹, 张勃, 罗静, 等. 基于SPEI的华北地区近50年干旱发生强度的特征及成因分析[J]. 自然灾害学报, 2014, 23(4): 192-202. [Zhou Dan, Zhang Bo, Luo Jing, et al. SPEI-based intensity characteristics and cause analysis of drought in North China during recent 50 years[J]. Journal of Natural Disasters, 2014, 23(4): 192-202.]

[24] 刘珂, 姜大膀. 基于两种潜在蒸散发算法的SPEI对中国干湿变化的分析[J]. 大气科学, 2015, 39 (1): 23-36. [Liu Ke, Jiang Dabang. Analysis of dryness/wetness over China using Standardized Precipitation Evapotranspiration Index based on two evapotranspiration algorithms[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2015, 39 (1): 23-36.]

[25] 刘钰, 蔡林根. 参照腾发量的新定义及计算方法对比[J]. 水利学报, 1997(6): 28-34. [Liu Yu, Cai Lingen. Update definition and computation of reference evapotranspiration comparison with former method[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997(6): 28-34.]

[26] 沈国强, 郑海峰, 雷振锋. SPEI指数在中国东北地区干旱研究中的适用性分析[J]. 生态学报, 2017, 37(11): 3787-3795. [Shen Guoqiang, Zheng Haifeng, Lei Zhenfeng. Applicability analysis of SPEI for drought research in Northeast China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(11): 3787-3795.]

[27] 贾艳青, 张勃. 1960—2017年中国北方气候干湿变化及其与ENSO的关系[J]. 地理科学, 2020, 40(12): 2115-2124. [Jia Yanqing, Zhang Bo. Correlation analysis of variation of dry-wet climate and ENSO in northern China during 1960-2017[J]. Scientia Geographica Sinica, 2020, 40(12): 2115-2124.]

[28] 徐冬平, 卜金洋, 杨军辉. 黄河流域水分盈亏量时空变化及其影响因素[J]. 干旱区研究, 2016, 33(4): 739-746. [Xu Dongping, Bu Jinyang, Yang Junhui. Spatiotemporal change of water budget and its affecting factors in the Yellow River Basin[J]. Arid Zone Research, 2016, 33(4): 739-746.]

[29] 杨金虎, 张强, 王劲松, 等. 近60年来西南地区旱涝变化及极端和持续性特征认识[J]. 地理科学, 2015, 35(10): 1333-1340. [Yang Jinhu, Zhang Qiang, Wang Jinsong, et al. Extreme and persistent feature of drought and flood of Southwest China in past 60 years[J]. Scientia Geographica Sinica, 2015, 35(10): 1333-1340.]

[30] 曹永强, 路洁, 李玲慧. 基于SPEI指数的辽宁省多尺度旱涝特征分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2021, 19(2): 210-220. [Cao Yongqiang, Lu Jie, Li Linghui. Analysis of multi-scale drought and flood characteristics in Liaoning Province based on SPEI[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2021, 19(2): 210-220.]

[31] 侯青青, 裴婷婷, 陈英, 等. 1986—2019年黄土高原干旱变化特征及趋势[J]. 应用生态学报, 2021, 32(2): 649-660. [Hou Qingqing, Pei Tingting, Chen Ying, et al. Variations of drought and its trend in the Loess Plateau from 1986 to 2019[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(2): 649-660.]

Analysis of multi-scalar characteristics of dry and wet conditions in the Yellow River Basin based on SPEI

GAO Bingli, GONG Jie, LI Yan, JIN Tiantian

(College of Earth and Environmental Sciences/Key Laboratory of Western China's Environmental Systems Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: Based on daily data from 70 meteorological stations in the Yellow River Basin from 1960 to 2020, the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) based on precipitation and potential evapotranspiration was calculated. Then, the evolution and persistence characteristics of dry-wet change of the Yellow River Basin from 1960 to 2020 were studied and their influence on meteorological factors was analyzed. Results showed the following: (1) There were differences in dry and wet grades and frequencies among the SPEI at different time scales and dry and wet levels were dominated by normal and light conditions. There was an insignificant wetness trend in summer and an insignificant dryness trend annually, and during spring, autumn, and winter from 1960 to 2020 in the Yellow River Basin. Geographically, the summer climate was mainly wet and 64.29% of meteorological stations showed an increased SPEI. The annual, spring, autumn, and winter climate in the Yellow River Basin was mainly dry and 51.43%, 62.86%, 64.29%, and 51.43% of meteorological stations showed a decrease SPEI, respectively. (2) For the different time scales of dry and wet events, 1970−1979 was a partial dry period, whereas 1960−1969 was a partial wet period, and the frequency of dry and wet events was as follows: autumn > summer > spring > winter. (3) From persistent characteristics of dry and wet events, the intensity of ongoing drought events increased and occurred mainly in autumn and winter, whereas the intensity of persistent wet events increased and occurred mainly in autumn. (4) A decreasing trend in the SPEI from 1960 to 2020 was mainly due to combined effects of a decrease of precipitation, average wind speed and relative humidity.

Keywords: Standardized Precipitation Evapotranspiration Index; dry and wet change; persistence; Yellow River Basin